

## ЗАВИСИМОСТЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВ ВУЛКАНИТОВ ОТ ИХ СТРУКТУРНОЙ РЫХЛОСТИ

© 2017 г. О. К. Иванов

Причины последовательности кристаллизации минералов магматических пород – одна из не полностью решенных проблем петрологии. При этом в разных науках их объясняют по-разному.

В магматической петрографии установлено, что в плутонитах, кристаллизовавшихся в близравновесных условиях, последовательность кристаллизации определяется концентрацией минералообразующих компонентов и идет от преобладающих минералов к второстепенным и аксессуарным (правило А.Б. Наливкина [1966]). В то же время в неравновесных вулканитах кристаллизация более соответствует правилу Г. Розенбуша [1934], когда она идет от аксессуарных минералов к оливину, орто- и клинопироксену, амфиболу, биотиту, затем плагиоклазам от анортита к альбиту, калинатровым полевым шпатам, кварцу и, наконец, вулканическому стеклу. Отклонений от правила Г. Розенбуша много, но главная особенность – последовательность кристаллизации минералов наблюдается в направлении от аксессуарных минералов к петрогенным силикатам. В промежуточных по степени неравновесности условиях отмечаются промежуточные варианты последовательности [Иванов, 1987, 1988, 2008, 2016]. Предполагается, что последовательность кристаллизации вулканитов могла определяться энергетическими причинами.

В то же время в области энергетической кристаллохимии А.Е. Ферсман [1934], В.С. Урусов [1975] и В.В. Зуев [2005] сформулировали законы о связи последовательности кристаллизации минералов ортомагматов с уменьшением энергий решетки, атомизации и энергоплотности, что противоречит петрографическим данным.

Сопоставление энергетических параметров с последовательностью кристаллизации минералов на конкретном петрографическом материале отдельно для неравновесных вулканитов и близравновесных плутонитов близкого состава показало две разных зависимости. В неравновесных вулканитах энергии решетки, атомизации и энергоплотности не уменьшаются в ходе кристаллизации, как требуют кристаллохимические законы, а возрастают, тогда как для близравновесных плутонитов характерны отсутствие корреляции параметров или сложные зависимости в виде зигзагообразных ли-

ний, куполов и впадин [Иванов, 2017]. Одной из причин расхождения результатов было то, что кристаллохимии рассматривали энергетические параметры как "...энергию, которая выделяется при образовании кристалла из бесконечно разреженного газа индивидуальных атомов" [Урусов, 1975, с. 48], тогда как в природе кристаллизация происходит из концентрированного и существенно структурированного расплава.

Оценка влияния температуры плавления минералов показала удовлетворительную корреляцию последовательности кристаллизации с этим параметром для вулканитов и почти полное отсутствие корреляции для плутонитов [Иванов, 2016].

Была предположена возможность зависимости последовательности кристаллизации от структурной плотности или структурной рыхлости минералов. Структурная плотность кристаллической решетки минералов как показатель условий минералообразования детально проанализирована Н.З. Евзиковой и Г.В. Ициксоном [1969], которые, ссылаясь на работы В.И. Лебедева, сделали важный вывод, что понижение структурной рыхлости наблюдается в процессах, идущих с поглощением тепловой и динамической энергии, например при грейзенизации, скарнировании и региональном метаморфизме. Тогда как при магматической кристаллизации, гранитизации и кристаллизации из морских вод, которым свойственно выделение энергии, структурная рыхлость минералов увеличивается. Они же предположили, что между структурной рыхлостью и термодинамическими характеристиками возможно установление количественной связи, что "сильно облегчило бы приложение законов не только термодинамики, но и кинетики к природным процессам".

В.В. Зуев считает, что "привлекательной стороной параметра  $\omega$  <структурная рыхлость минералов> является его простота, четкий охарактеризованный физический смысл и возможность применения к кристаллическим соединениям любой сложности, состава и структуры" [2005]. Он же установил, что структурная рыхлость может давать количественные прогнозные оценки для 20 физических свойств минералов, что представляет собой крупнейшее достижение в минералогии. Поскольку все термодинамические и физико-химические энерге-

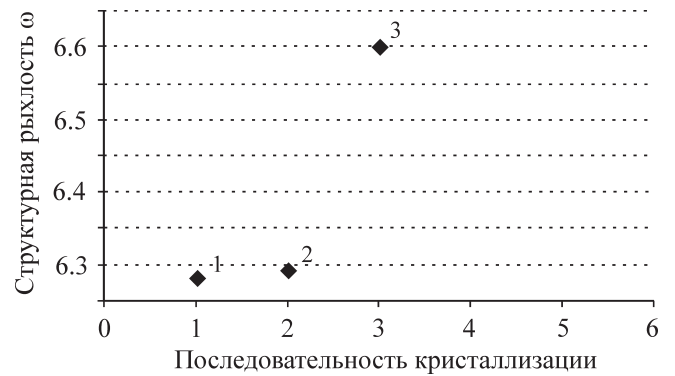
тические параметры разработаны для равновесных условий, которые в природе имеют ограниченное значение, то было логично использовать структурную рыхлость решеток минералов для оценки влияния этого параметра на последовательность кристаллизации минералов ортомагматов, тем более что приводимые Н.З. Евзиковой и В.В. Зуевым примеры в этом отношении не затрагивали собственно магматических пород.

Параметр структурной рыхлости, обратный структурной плотности [Евзикова, Ициксон, 1969], вычисляется по формуле  $\omega = M/(nr)$ , где  $M$  – молекулярная масса, равная сумме атомных масс элементов соединения,  $n$  – число структурных узлов (атомов, ионов, комплексов или радикалов),  $\rho$  – плотность минерала. Структурная рыхлость измеряется в см<sup>3</sup>/г-атом. По В.В. Зуеву [2005], структурная рыхлость минералов косвенно характеризует энергию межатомного взаимодействия кристаллов и входит в список важнейших энергетических характеристик минералов. В.В. Зуев считает, что параметр  $\omega$  отражает уплотнение (сжатие) слагающих это вещество атомов благодаря эффекту химической связи [2005, с. 117]. По его мнению, чем прочнее химические межатомные связи и больше их энергия, тем больше проявляется эффект стягивания атомов в компактную кристаллическую решетку и тем меньше будет величина ее структурной рыхлости. Таким образом, существует обратная связь между показателем  $\omega$  и стабильностью (механической и термодинамической) твердого тела.

Задача состояла в отборе ортомагматических пород с четкими признаками последовательности кристаллизации и корреляции со структурной рыхлостью минералов. Для проверки построены диаграммы корреляции последовательности кристаллизации минералов со структурной рыхлостью минералов для пород разных состава и степени неравновесности. Последовательность определяли по относительному идиоморфизму минералов на основании принципа идиоморфизма Г. Розенбуша с учетом замечаний Д.П. Григорьева и А.Г. Жабина [1971]. Данные по структурной рыхлости брали из таблиц, приведенных В.В. Зуевым [2005]. Материал по последовательности кристаллизации ортомагматов взят из классических петрографических работ [Заварицкий, 1955; Магматические..., 1983] и из публикаций автора.

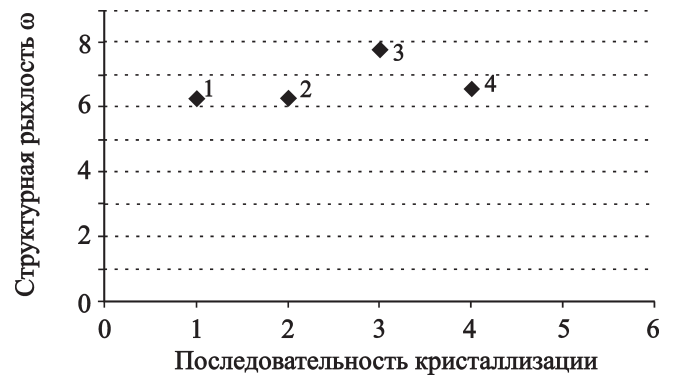
Брали пары пород близкого, но не идентичного состава – вулканические неравновесные и плутонические близравновесные породы ультраосновного, основного, среднего и кислого состава. В связи с ограниченным объемом текста приведены данные только для вулканических, кристаллизовавшихся в резко и сильно неравновесных условиях по классификации автора [Иванов, 2006а, б].

**Маймечит.** В маймечитах порядок идиоморфизма и последовательность кристаллизации следующие: хромшпинелид → оливин → диопсид →



**Рис. 1.** Зависимость последовательности кристаллизации минералов маймечитов от их структурной рыхлости.

Номера точек: 1 – хромшпинелид, 2 – оливин, 3 – диопсид.



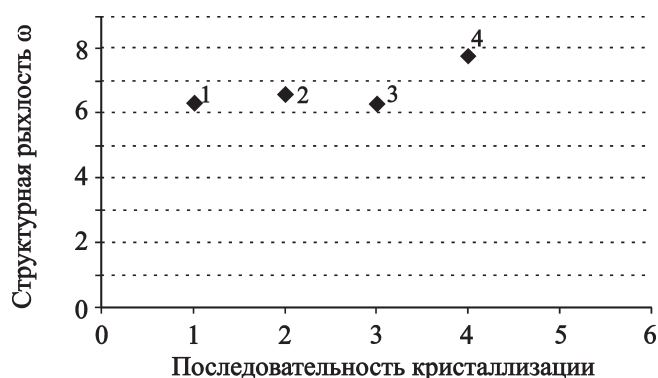
**Рис. 2.** Зависимость последовательности кристаллизации минералов оливинового базальта от их структурной рыхлости.

Номера минералов: 1 – хромшпинелид, 2 – оливин, 3 – лабрадор, 4 – диопсид.

стекло [Васильев, Золотухин, 1975]. На парных диаграммах корреляции “структурная рыхлость минерала–последовательность кристаллизации” наблюдается увеличение структурной рыхлости к концу кристаллизации (рис. 1).

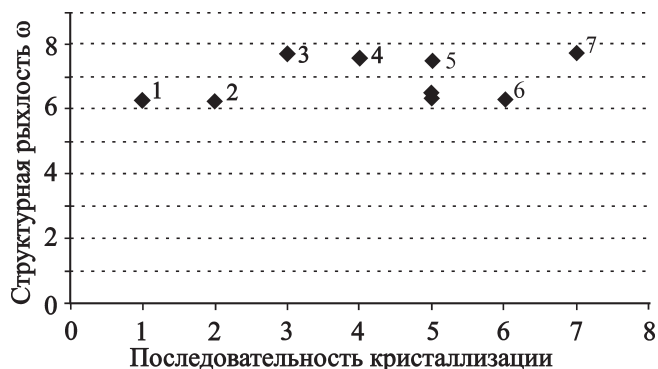
**Оливиновый базальт.** Для оливиновых базальтов, по В.И. Гоньшаковой [Магматические..., 1983, с. 197], “взаимоотношения минералов в породе и особенности состава минералов позволяют наметить следующую последовательность кристаллизации пород”: пикотит → оливин → плагиоклаз ( $Ap_{75-80}$ ) → Mg-пижонит → авгит → плагиоклаз ( $Ap_{50-60}$ ) → субкальциевый авгит → апатит → титаномагнетит. На диаграмме для оливиновых базальтов наблюдается слабая тенденция увеличения структурной рыхлости минералов к концу кристаллизации (рис. 2).

**Андезит.** С.В. Ефремова указывает разную последовательность кристаллизации вкрапленников и основной массы, отражающую раннюю кри-



**Рис. 3.** Последовательность кристаллизации минералов андезитов в зависимости от их структурной рыхлости.

Номера точек: 1 – магнетит, 2 – клинопироксен, 3 – амфибол, 4 – плагиоклаз.

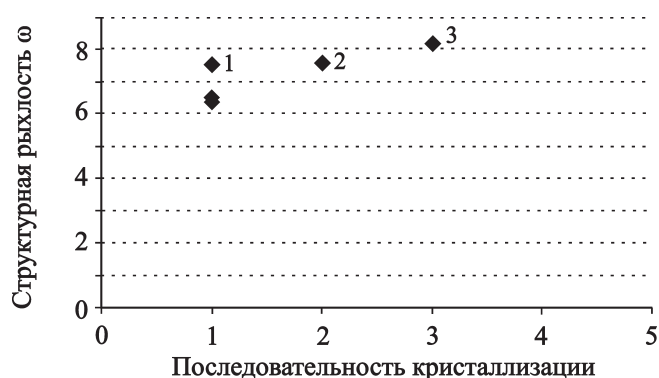


**Рис. 4.** Последовательность кристаллизации минералов дацита в зависимости от их структурной рыхлости.

Номера точек: 1 – оливин; 2 – энстатит; 3 – плагиоклаз; 4 – кварц; 5 – акцессории (сверху вниз): магнетит, циркон, апатит; 6 – амфибол; 7 – биотит.

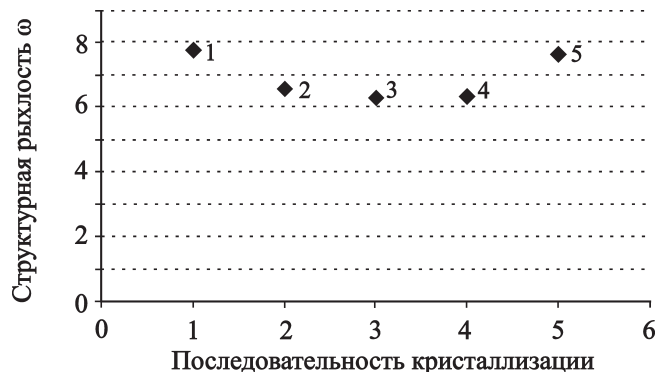
сталлизацию в промежуточных камерах [Магматические..., 1983, с. 400]. “В меланократовых разностях первыми появлялись ромбические и (или) моноклинные пироксены, далее шла их одновременная кристаллизация с плагиоклазом”, и процесс заканчивался массовой кристаллизацией микролитов и формированием вулканического стекла. В одних случаях первыми кристаллизуются темноцветные минералы, в других – плагиоклазы, в третьих – акцессорный магнетит [Фролова, Бурикова, 1977]. Общий порядок идиоморфизма и кристаллизации следующий: магнетит → клинопироксен → амфибол или биотит → плагиоклазы ( $Ap_{20-90}$ ). На диаграммах корреляции видно, что в андезитах структурная рыхлость минералов возрастает к концу кристаллизации, за исключением амфибола (рис. 3).

**Дацит.** По В.В. Наседкину [1975], последовательность кристаллизации, определенная по идиоморфизму и температурам кристаллизации, следующая: оливин → ромбический пироксен → плагиоклаз



**Рис. 5.** Последовательность кристаллизации минералов риолитов в зависимости от их структурной рыхлости.

Номера точек: 1 – оливин, 2 – кварц, 3 – амфибол, 4 – биотит.



**Рис. 6.** Последовательность кристаллизации минералов габбро и их структурная рыхлость.

Номера точек: 1 – лабрадор, 2 – клинопироксен, 3 – амфибол, 4 – магнетит, 5 – биотит.

(от лабрадора до олигоклаза) → кварц → гранат → амфибол → биотит. На диаграммах наблюдается очень слабое общее увеличение структурной рыхлости минералов к концу кристаллизации (рис. 4).

**Риолит.** По В.В. Наседкину [Наседкин, 1975; Магматические..., 1983, с. 572], по данным термометрии включений последовательность кристаллизации вкрапленников следующая: оливин → кварц → ромбический пироксен → плагиоклаз (от  $Ap_{35-40}$  до  $Ap_{15-22}$ ) → гранат → санидин → амфибол → биотит. При этом температура кристаллизации вкрапленников  $1370-800^{\circ}C$ , основной массы –  $1000-670^{\circ}C$ . На диаграммах корреляции для неравновесных риолитов наблюдается слабая тенденция увеличения общей структурной рыхлости минералов к концу кристаллизации (рис. 5).

В качестве примера последовательности кристаллизации минералов плутонитов приведем габбро с симметричным вогнутым расположением фигуративных точек, не показывающих четкой зависимости (рис. 6).

Анализ последовательности кристаллизации минералов в зависимости от их структурной рыхлости позволил сделать следующие выводы.

1. В большинстве случаев наблюдается увеличение или тенденция к увеличению структурной рыхлости минералов вулканитов, кристаллизующихся на поздней стадии, наиболее четкое для маймечитов и андезитов в отличие от плутонитов, где такая корреляция отсутствует.

2. По сравнению с температурой плавления минералов показатель структурной рыхлости минералов менее информативен и не определяет четко последовательность кристаллизации.

3. Вывод Н.З. Евзиковой и Г.В. Ициксон [1969] о повышении структурной рыхлости минералов магматических пород в процессе кристаллизации следует дополнить: увеличение или тенденция к увеличению структурной рыхлости минералов в процессе кристаллизации магматических пород происходит только для *вулканитов, кристаллизовавшихся в неравновесных условиях*.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильев Ю.Р., Золотухин В.В.* Петрология ультрабазитов севера Сибирской платформы и некоторые проблемы их генезиса. Новосибирск: Наука, 1975. 271 с.
- Григорьев Д.П., Жабин А.Г.* Онтогенез минералов. Индивиды. М.: Наука, 1971. 339 с.
- Евзикова Н.З., Ициксон Г.В.* Структурная плотность решетки как показатель условий минералообразования // ЗВМО. 1969. № 2. С. 129–149.
- Заварицкий А.Н.* Изверженные горные породы. М.: АН СССР, 1955. 480 с.
- Зуев В.В.* Конституция, свойства минералов и строение Земли (Энергетические аспекты). М.: Наука, 2005. 402 с.
- Иванов О.К.* О факторах, определяющих последовательность кристаллизации минералов ортомагматов // Минералогия – народному хозяйству: тез. докл. VII съезда Всесоюз. минерал. о-ва. Л.: Наука, 1987. С. 214–215.
- Иванов О.К.* Зональность и условия равновесной кристаллизации ортомагматических минералов // Теория минералогии. Л.: Наука, 1988. С. 91–96.
- Иванов О.К.* Минералогические признаки равновесной и неравновесной кристаллизации ортомагматических горных пород // Урал. геол. журн. 2006а. № 1 (49). С. 75–84.
- Иванов О.К.* Типы равновесной-неравновесной магматической кристаллизации // Урал. геол. журн. 2006б. № 6 (54).
- Иванов О.К.* Порядок кристаллизации минералов в равновесных и неравновесных ортомагматических горных породах // Урал. геол. журн. 2008. № 2 (62). С. 17–35.
- Иванов О.К.* Влияние температуры плавления минералов на последовательность их кристаллизации в природных условиях // Урал. геол. журн. 2016. № 6 (114). С. 31–40.
- Иванов О.К.* Анализ кристаллохимических законов о причинах последовательности кристаллизации минералов ортомагматов // Урал. геол. журн. 2017. № 2 (116). С. 21–60.
- Магматические горные породы / под ред. О.А. Богатикова. Т. 1, 2. М.: Наука, 1983. 786 с.
- Наливкин А.Б.* Критерии последовательности образования минералов // Тр. ВСЕГЕИ. 1966. Т. 65. С. 46–57.
- Наседкин В.В.* Петрогенезис кислых вулканитов. М.: Наука, 1975.
- Розенбуш Г.* Описательная петрография / пер. В.Н. Лодочникова. М.: Госгеонефтеиздат, 1934. 720 с.
- Урусов В.С.* Энергетическая кристаллохимия. М.: Наука, 1975. 335 с.
- Ферсман А.Е.* Геохимия. Т. 1. М.: Госхимтехиздат, 1934. 324 с.
- Фролова Т.И., Бурикова И.А.* Геосинклинальный вулканизм (на примере восточного склона Южного Урала). М.: МГУ, 1977.